

地盤と構造物の地震時動的相互作用

—地盤インピーダンスと有効入力—

岡山大学工学部 正員 竹宮宏和
建設技術研究所 正員 甲斐史郎

1. まえがき

地震時における構造物の応答性状は、一般に構造物自身の動特性のみでなく、その建設地盤内の地震波の伝播に伴う相互作用とも密接に関係している。本研究では、地盤と基礎の地震時動的相互作用解析を通して地盤インピーダンスと有効入力部面を3次元解析(軸対称モデル非軸対称荷重問題)から行ない、これらを用いた下部構造系と上部構造系の連成振動解析と動的サブストラフィ法を適用して実施した。

2. 解析

本定式化では、円筒座標系を採用して3次元の広がりを考慮し、変位と荷重を円周方向に級数展開することにより、非軸対称荷重状態(並進、ロッキング)を並似的に扱った。また、仮想有限境界としては、側方に応力伝達境界、下方に剛基礎を設定した。前者は基礎周辺の不規則領域より外の半無限遠地盤効果を考慮するものであり、後者は地盤入力面を与えるものである。(図1参照) 不規則領域は、アイソパラメトリック要素による有限要素法を適用した。いま、接触面モデル¹⁾を採用して運動方程式²⁾

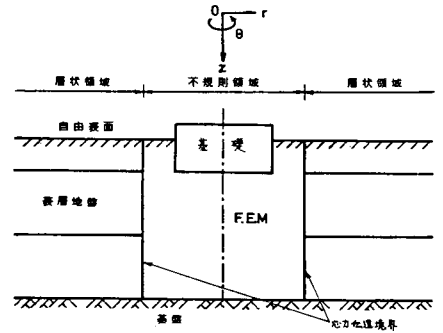


図1. 軸対称モデル

$$(\Omega^2[M] + [K] + [R])\{U\} = (-[D_{ii}] + [R])\{Y_i^*\} - [D_{ij}]\{Y_j^*\} + \{P\} \quad (1)$$

を得る。ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $[R]$ は応力伝達境界の動的剛性マトリックス、 $\{U\}$ は絶対変位ベクトル、 $[D_{ii}]$ 、 $[D_{ij}]$ は自然地盤の静的剛性マトリックス、 $\{Y_i^*\}$ 、 $\{Y_j^*\}$ は自然地盤の応答変位ベクトルを表わす。そして添字 i 、 j はそれぞれ自由節点、基礎面境界節点を指す。式(1)で基礎との接触節点について縮合した形とみると、それらの節点に関する地盤インピーダンスマトリックス $[X_F]$ 、および有効入力ベクトル $\{P_F\}$ が得られる。

つぎに、基礎-上部構造系の運動方程式で、基礎には地盤との接触節点における断面力と上記の地盤解析から導入し、上部構造系には固有振動モードを設定すると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} [R_{ii}] + [Y]^T(-\Omega^2[M_F] + [X_F])[Y] & [K_{is}] \\ [K_{si}] & [K_{ss}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_i\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -[Y]^T\{P_F\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $[R]$ は基礎-上部構造系の動的剛性マトリックス、 $[M_F]$ は基礎の質量マトリックス、 $[Y]$ は基礎重心と基礎周辺節点との間の変位変換マトリックス、 $[X]$ に添字 i 、 s は地盤と基礎の接触節点および上部構造系の自由節点を指す。 $\{q\}$ は上部構造系の固有振動モード座標である。式(2)より基礎面入力に対する振動数応答計算される。上部構造系については、モード座標から物理座標に変換する。

1) 竹宮：地盤-基礎-上部構造系への地盤応答解析-動的サブストラフィ法の適用-。土と基礎、No.1259、昭和56年9月、pp.27-34

2) Novak, M.: Effect of Soil on Structural Response to Wind and Earthquake, Earthq. Eng. & Struc. Dyn. Vol.3, 1974, pp.79-96

3. 解析例

解析対象系として、図2のような超高煙突構造物を図3の基礎は、三層地盤内に掘入されたものにケーンがある。基礎重心についての地盤インピーダンスを、バネおよび減衰係数として図3に示した。同図には、比較のためのNovakの近似解も描かれている。後者は、地盤の固有振動を考慮して11モードの、それぞれ一定値であるが、今回の有限要素解は、地盤の固有振動を反映して振動数に大きく依存していることが判かる。図4には、地盤-基礎-上部構造物の振動数応答を示した。同図より基礎の動きは地盤振動に大きく影響され、上部構造物にはそれ自体の固有振動モードと地盤との動的相違を及ぼす振動モード、さらに地盤振動が加わっていることが判かる。地震応答解析として、入力波に宮城県沖地震の開地橋T₁記録(短周期型で0.2~0.3秒に卓越周期を有する)を採用し、基礎面を最大加速度100 galに修正(ときの応答時刻歴を)図5、6に示した。このより、構造物の応答は、変位に関しては、その基本固有振動モードに支配されているが、加速度に関しては高次振動モードが顕著に現われている。そして基礎では、ほとんど地盤と同一の動きを示していることが判かる。

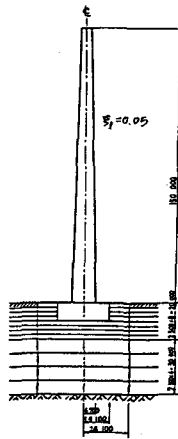


図2. 解析対象物

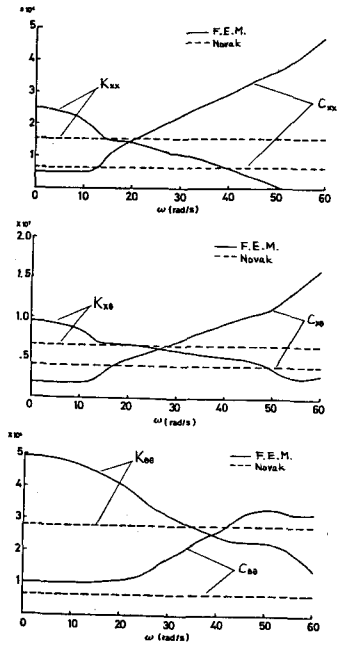


図3. 地盤インピーダンス

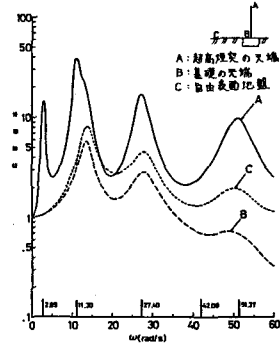
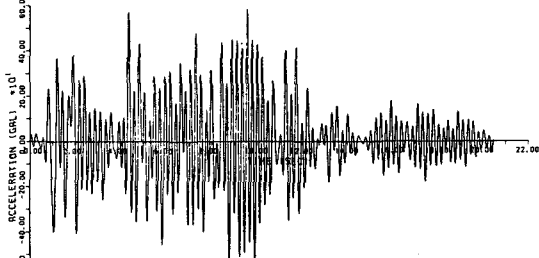
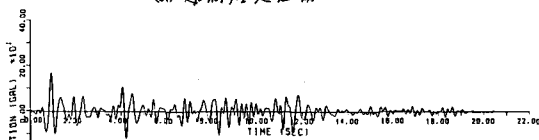


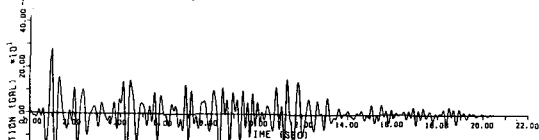
図4. 振動数応答



(a) 超高煙突先端



(b) 基礎先端



(c) 自由表面地盤

図5. 加速度時刻歴応答

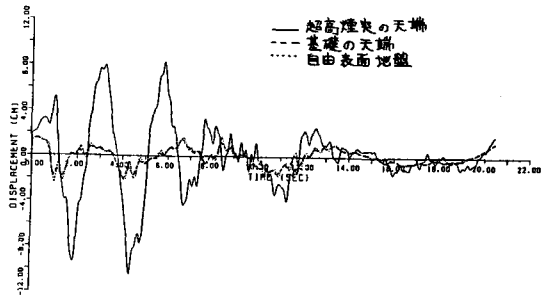


図6. 変位時刻歴応答